ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО СТАНДАРТАМ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

БЕЗОПАСНОСТЬ РАДИАЦИОННАЯ ЭКИПАЖА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЕТЕ. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПОГЛОЩЕННОЙ И ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ДОЗЫ ОТ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ

РД 50—25645.207—85

Цена 5 коп.

Москва
ИЗДАТЕЛЬСТВО СТАНДАРТОВ
1986

gost.e-ecolog.ru

ИСПОЛНИТЕЛИ

Г. А. Варлашова; Ю. А. Винтенко, канд. техн. наук; **А. И. Вихров,** канд. физ.-мат. наук; **В. А. Гончарова; Е. В. Горчаков,** д-р физ.-мат. наук; **А. И. Григорьев,** д-р мед. наук; **В. Е. Дудкин,** канд. физ.-мат. наук; **О. Н. Карпов; Е. Е. Ковалев,** д-р техн. наук; **В. С. Литвиненко,** канд. техн. наук; **М. И. Панасюк,** канд. физ.-мат. наук; **В. А. Панин; Ю. В. Потапов,** канд. физ.-мат. наук; **И. Я. Ремизов,** канд. техн. наук; **В. Д. Степнов,** канд. физ.-мат. наук; **В. И. Шумшуров**

УТВЕРЖДЕНЫ И ВВЕДЕНЫ В ДЕЙСТВИЕ Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 19 ноября 1985 г. № 3619

УДК 629.78—784.7 : 539.16 Группа Ф40

РУКОВОДЯЩИЙ НОРМАТИВНЫЙ ДОКУМЕНТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета поглощенной и эквивалентной дозы от многозарядных ионов космических лучей

РД 50—25645.207—85

Введены впервые

ОКСТУ 6968

Утверждены Постановлением Госстандарта от 19 ноября 1985 г. № 3619, срок введения установлен

с 01.01.87

Настоящие методические указания устанавливают методику расчета поглощенных и эквивалентных доз в произвольной точке тканеэквивалентного фантома от многозарядных ионов космических лучей (МЗИ КЛ) с энергией на нуклон ниже 10^4 МэВ.

Термины, применяемые в настоящих методических указаниях, и их пояснения приведены в справочном приложении.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Под многозарядными ионами космических лучей понимают ядра химических элементов, входящих в состав галактических космических лучей (ГКЛ), с зарядом 2 и выше.

1.2. Расчеты поглощенной и эквивалентной дозы (далее по тексту — дозы) проводят для представительных ядер групп ГКЛ, которые определяют следующим образом:

группа ядер гелия, представительное ядро ^{4}He;

группа легких ядер, представительное ядро ^{9}Be;

группа средних ядер, представительное ядро ^{14}N;

группа тяжелых ядер, представительное ядро ^{28}Si;

группа очень тяжелых ядер, представительное ядро ^{56}Fe.

1.3. При изотропном падении МЗИ КЛ на тканеэквивалентный фантом дозу в его произвольной точке $\vec{r_0}$ определяют по формуле

$$D(\vec{r_0}) = \int D(\xi) \cdot w(\xi, \vec{r_0}) d\xi,$$

где $D(\xi)$ — доза за слоем тканеэквивалентного вещества толщиной (ξ);

★

© Издательство стандартов, 1986

$w(\xi, \vec{r_0})$ — функция экранированности точки $\vec{r_0}$, определяемая по ГОСТ 25645.204—83.

1.4. Под тканеэквивалентным фантомом понимают антропоморфный тканеэквивалентный гомогенный фантом или его упрощенные модели (цилиндр и шар) согласно ГОСТ 25645.203—83. Химический состав тканеэквивалентного вещества принимают по ГОСТ 18622—79.

1.5. В качестве значений $D(\xi)$ берут значения доз на глубине ξ плоского полубесконечного слоя тканеэквивалентного вещества при нормальном падении на него МЗИ КЛ с заданным энергетическим спектром.

1.6. Принимают, что доза в тканеэквивалентном веществе создается как падающими МЗИ КЛ, так и ядерными фрагментами и нейтронами срыва, образующимися в результате фрагментации падающих ядер.

1.7. Принимают, что формирование доз обусловлено только следующими процессами:

ионизационными потерями заряженных частиц;

ослаблением первичного и вторичного излучений за счет ядерных взаимодействий;

образованием ядерных фрагментов и нейтронов срыва при взаимодействии первичных ядер и ядерных фрагментов с ядрами, входящими в состав тканеэквивалентного вещества.

2. МЕТОД РАСЧЕТА ДОЗ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНОГО ФАНТОМА

2.1. Для функции экранированности, заданной в кусочно-постоянном виде, дозу в точке фантома $\vec{r_0}$ определяют по формуле

$$D(\vec{r_0}) = \sum_{l=1}^{l=l_{max}} D(\xi_l') \cdot w^l(\vec{r_0}) \cdot (\xi_l - \xi_{l-1}), \quad (1)$$

где $w^l(\vec{r_0})$ — значение функции экранированности относительно точки $\vec{r_0}$, постоянное на отрезке $[\xi_{l-1}, \xi_l]$,

$$\xi_l' = 0.5 \cdot (\xi_{l-1} + \xi_l) \quad (2)$$

2.2. Номерам групп МЗИ КЛ и ядерных фрагментов присваивают следующие значения:

$i=1$ для группы протонов;

$i=2$ для группы ядер гелия;

$i=3$ для группы легких ядер;

$i=4$ для группы средних ядер,

$i=5$ для группы тяжелых ядер;

$i=6$ для группы очень тяжелых ядер.

2.3. Дозу от МЗИ КЛ на произвольной глубине ξ определяют по формуле

$$D(\xi)=\sum_{i=2}^{i=6} D^i(\xi)\,, \tag{3}$$

где $D^i(\xi)$ — вклад в дозу на глубине ξ от падающих МЗИ КЛ i-й группы.

2.4. Дозу от падающих МЗИ КЛ i-й группы определяют по формуле

$$D^i(\xi)=D_i^i(\xi)+\sum_{j=1}^{j=i-1} D_j^i(\xi)+D_0^i(\xi)\,, \tag{4}$$

где $D_i^i(\xi)$ — доза, обусловленная ионизационными потерями первичных МЗИ КЛ;

$D_j^i(\xi)$ — доза, обусловленная ионизационными потерями вторичных ядерных фрагментов j-й группы;

$D_0^i(\xi)$ — доза, обусловленная нейтронами срыва.

Верхний индекс относится к группе падающих МЗИ КЛ, нижний — к группе ядерных фрагментов, приходящих в точку на глубине ξ.

2.5. В последующих пунктах методических указаний дозы на глубине ξ представлены в виде линейных функционалов от пространственно-энергетического флюенса — $F_j^i(\xi, E)$ Функция $F_j^i(\xi, E)$ является решением системы уравнений:

$$\frac{\partial F_i^i(\xi,E)}{\partial\xi}+\frac{1}{\lambda'_i}\cdot F_i^i(\xi,E)-\frac{\partial}{\partial E}[S_i(E)\cdot F_i^i(\xi,E)]=F_i^i(0,E)\times\delta(\xi)\,, \tag{5}$$

$$\frac{\partial F_j^i(\xi,E)}{\partial\xi}+\frac{1}{\lambda'_j}\cdot F_j^i(\xi,E)-\frac{\partial}{\partial E}[S_j(E)\cdot F_j^i(\xi,E)]=\sum_{k=j+1}^{k=i}\frac{P_{kj}}{\lambda'_k}\cdot F_k^i(\xi,E)\,.$$

В системе уравнений (5):

$j=1, \ldots, i-1$;

$S_j(E)$ — ионизационные потери ядер группы j с энергией E, определяемые по РД 50—25645.206—84;

k — номер группы ядер, из которых образуются ядра группы j;

P_{kj} — параметры фрагментации ядер группы k в ядра группы j;

$\lambda'_j \equiv \frac{\lambda_j}{1-P_{jj}}$, где λ_j—средняя длина свободного пробега до ядерного взаимодействия;

$F_i^i(0, E) = \int \varphi^i(t, E) dt$,

где $\varphi^i(t, E)$ — энергетический спектр МЗИ КЛ группы i (интегрирование проводится по данному промежутку времени космического полета);

$\delta(\xi)$ — дельта-функция.

2.6. Вводим функцию ионизационного пробега:

$$R_j(E) = \int_0^E \frac{d\varepsilon}{S_j(\varepsilon)} \tag{6}$$

2.7. Дозу от первичных МЗИ КЛ определяют по формуле

$$D_i^i(\xi) = \int_{E_{min}^i}^{E_{max}^i} dE_0 \cdot F_i^i(0, E_0) \cdot \exp\left(-\frac{\xi}{\lambda'_i}\right) \cdot G_i(E), \tag{7}$$

где $G_i(E) = S_i(E)$ — в случае поглощенной дозы;

$G_i(E) = S_i(E) \cdot K[S_i(E)]$ — в случае эквивалентной дозы (K — коэффициент качества);

E_0 — энергия МЗИ КЛ, падающих на фантом;

$$E = R_i^{-1}[R_i(E_0) - \xi],$$

R_i^{-1} — функция, обратная функции R_i, введенной в п. 2.6;

E_{max}^i и E_{min}^i — соответственно максимальная и минимальная энергии МЗИ КЛ.

2.8. Дозу от вторичных ядерных фрагментов j-й группы ($j < i$) определяют по формуле

$$D_j^i(\xi) = \sum_{k=j+1}^{k=i} P_{kj} \cdot \int_{E_{min}^*}^{E_{max}^*} dE^* \int_0^{\xi} \frac{d\xi^*}{\lambda'_k} \cdot F_k^i(\xi^*, E^*) \cdot \exp\left(-\frac{\xi - \xi^*}{\lambda'_j}\right) \times$$

$$\times G_j(E), \tag{8}$$

где $G_j(E)$ имеет тот же смысл, что и в п. 2.7;

E^* — энергия фрагментов, образующихся в точке взаимодействия на глубине ξ^*;

$$E = R_j^{-1}[R_j(E^*) + \xi - \xi^*].$$

Верхнюю и нижнюю границы интегрирования для k-й группы определяют по формулам:

$$E_{max}^* = R_k^{-1}[R_k(E_{max}^i) - \xi^*],$$

$$E_{min}^* = R_i^{-1}[R_i(E_{min}^i) - \xi^*].$$

2.9. Дозу от нейтронов срыва определяют по формуле

$$D_0^i(\xi) = \sum_{k=2}^{k=i} P_{k1} \cdot \int_{E^*_{min}}^{E^*_{max}} dE^* \int_0^{\xi} \frac{d\xi^*}{\lambda'_k} \cdot F_k^i(\xi^*, E^*) \cdot H(\xi - \xi^*, E^*), \quad (9)$$

где $H(\xi, E)$ — функция глубинного распределения доз от моноэнергетических нейтронов, нормально падающих на полубесконечный слой тканеэквивалетного вещества.

3. ОПИСАНИЕ ВХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

3.1. Значения средних пробегов ядер i-й группы до ядерного взаимодействия λ_i и параметров фрагментации P_{ij} для различных значений зарядов Z_i и массовых чисел A_i представительных ядер определяют по ГОСТ 25645.212—85.

3.2. Таблицы значений ионизационных потерь $S_{i\mu}$ и ионизационных пробегов $R_{i\mu}$ в тканеэквивалентном веществе на сетке значений энергии E_μ рассчитывают согласно РД 50—25645.206—84. Значения $S_i(E)$ и $R_i(E)$ для промежуточных значений энергий определяют интерполяцией. Энергию ядра i-й группы с заданным ионизационным пробегом определяют обратной интерполяцией таблицы E_μ.

3.3. Значения функции глубинного распределения поглощенных и эквивалентных доз для нейтронов $H(\xi, E)$ из п. 2.9 берут согласно «Атласу дозовых характеристик внешнего ионизирующего излучения». Значения этой функции в промежуточных точках по глубине и энергии определяют путем двойной интерполяции.

3.4. Значение коэффициента качества от полной линейной передачи энергии $K(L_\infty)$ определяют согласно регламентированной зависимости по ГОСТ 8.496—83. В данных методических указаниях при определении $K(L_\infty)$ принимают, что $L_\infty(E) = S_i(E)$ для ядер i-й группы.

3.5. Энергетический спектр i-й группы МЗИ КЛ за промежуток времени T космического полета представляют в интегральном виде

$$\Phi^i(E) = \int_E^{E^i_{max}} dE_0 \int_T dt \cdot \varphi^i(t, E_0)$$

На сетке значений E_ν задают величины:

$\Phi^i_\nu = \Phi^i(E_\nu)$, где $\nu = 1, \ldots, \nu_{max}$;

$\Phi^i_0 = \Phi^i(E^i_{min})$.

4. АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДОЗ В ПРОИЗВОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ТКАНЕЭКВИВАЛЕНТНОГО ФАНТОМА

4.1. Задание исходных данных.

4.1.1. Задать таблицу зарядов Z_i и массовых чисел A_i представительных ядер i-й группы, значений их средних длин свободного пробега до ядерного взаимодействия λ_i и параметров фрагментации P_{ij} $(i=2, \ldots, 6;\ j=1, \ldots, 6)$.

4.1.2. Вычислить величины

$$P_i=\sum_{j=1}^{j=i-1} P_{ij} \qquad \text{и} \qquad \lambda_i' = \frac{\lambda_i}{1-P_{ii}}$$

4.1.3. Задать разбиение по глубине $\xi_l (l=0, \ldots, l_{max})$, значения функции экранированности ω^l, постоянных на отрезке $[\xi_{l-1}, \xi_l]$ $(l=1, \ldots, l_{max})$.

4.1.4. Вычислить величины:

$\xi_l' = 0{,}5 \cdot (\xi_l + \xi_{l-1})$ и $\Delta\xi_l = \xi_l - \xi_{l-1}$,

где $l=1, \ldots, l_{max}$.

4.1.5. Задать узлы сетки E_μ, таблицы величин $S_{i\mu}$, $R_{i\mu}$ $(\mu=1, \ldots, \mu_{max};\ i=1, \ldots, 6)$.

4.1.6. Задать узлы сетки ξ_p, E_q и таблицу величин H_{pq} $(p=1, \ldots, p_{max};\ q=1, \ldots, q_{max})$.

4.1.7. Присвоить $i=1$.

4.2. Определение начальных данных для i-й группы МЗИ КЛ.

4.2.1. Присвоить $i=i+1$.

4.2.2. Задать узлы сетки значений E_ν и величин Φ_ν^i $(\nu=0, \ldots, \nu_{max})$.

4.2.3. Задать полное число статистических испытаний для i-й группы — N.

4.2.4. Присвоить начальные значения накопителей для статистической оценки дозы $V_1^i = 0$ и для статистической оценки квадрата дозы $U_1^i = 0$.

4.2.5. Присвоить начальное значение номеру текущего статистического испытания $n=0$.

4.3. Определение начальных значений величин для n-го статистического испытания.

4.3.1. Присвоить начальные значения:

номеру ядерного взаимодействия $m=1$;

координате ядерного взаимодействия $h_0=0$;

номеру зарядовой группы фрагмента, образующегося в ядерном взаимодействии $j=i$;

статистическому весу ядерного взаимодействия $Q_1=1$.

4.3.2. Положить $n=n+1$.

4.3.3. Определить номер узла ν энергетической сетки из соотношения

$$\sum_{\nu'=\nu-1}^{\nu'=\nu_{max}} \Phi_{\nu'}^i > \eta \cdot \Phi_0^i \geqslant \sum_{\nu'=\nu}^{\nu'=\nu_{max}} \Phi_{\nu'}^i \quad (\nu'=1, \ldots, \nu_{max}).$$

Здесь и далее η — случайное число, равномерно распределенное в интервале [0, 1].

4.3.4. Определить начальное значение энергии падающего ядра МЗИ КЛ:

$$E_0 = E_{\nu-1} \cdot \exp\left[\frac{\ln(\eta \cdot \Phi^{i}_{0}) - \ln\Phi^{i}_{\nu-1}}{\ln\Phi^{i}_{\nu} - \ln\Phi^{i}_{\nu-1}} \cdot (\ln E_{\nu} - \ln E_{\nu-1})\right]$$

4.4. Расчет вклада в дозу на глубине ξ'_1 от первичного излучения для n-го испытания — D^{i}_{n1}.

4.4.1. Определить ионизационный пробег первичного $(j=i)$ МЗИ КЛ $R_j = R_j(E_0)$.

4.4.2. Для глубин $\xi'_1 > R_j$ присвоить $D^{i}_{n1} = 0$, для $\xi'_1 \leqslant R_j$ вычислить:

$$D^{i}_{n1} = \exp\left(-\frac{\xi'_1}{\lambda'_j}\right) \cdot G_j(E),$$

где $E = R_j^{-1}\,[R_j(E_0) - \xi'_1\,]$.

4.5. Определение точки ядерного взаимодействия.

4.5.1. Определить пробег до ядерного взаимодействия

$$\tau = -\lambda'_j \cdot \ln \eta.$$

4.5.2. Если $\tau > R_j$, то перейти к п. 4.3.

4.5.3. Определить координату взаимодействия

$$h_m = h_{m-1} + \tau.$$

Если $h_m > \xi_{l_{max}}$, то перейти к п. 4.3.

4.5.4. Определить энергию ядерного фрагмента в точке взаимодействия:

$$E_m = R_j^{-1}\,[R_j(E_{m-1}) - \tau]\,.$$

4.6. Расчет вклада в дозу на глубине ξ'_1 от вторичных излучений.

4.6.1. Присвоить начальное значение для накопителя оценок дозы по точкам ядерного взаимодействия $v^{i}_{1} = 0$.

4.6.2. Рассчитать значения ионизационных пробегов:

$$R_k = R(E_m) \quad \text{для} \quad k = 1, \ldots, j-1.$$

4.6.3. Рассчитать вклад в дозу от вторичных ядерных фрагментов — D_{n1j}.

$$D^{i}_{n1j} = Q_m \cdot \sum_{k=1}^{k=j-1} D^{i}_{n1k}\,.$$

Если $\xi'_1 - h_m > R_k$, то положить $D^{i}_{n1k} = 0$, если $\xi'_1 - h_m \leqslant R_k$, то вычислить

$$D^{i}_{n1k} = P_{jk} \cdot \exp\left(-\frac{\xi' - h_m}{\lambda'_k}\right) \cdot G_k(E),$$

где $E=R_k^{-1}\ [R_k(E_m)-\xi_l'+h_m]$.

4.6.4. Рассчитать вклад в дозу от нейтронов срыва

$$D_{nl0}^i=Q_m\cdot P_{jl}\cdot H(\xi_l'-h_m,\ E_{m-1}).$$

4.6.5. Положить $v_l^i=v_l^i+D_{nlj}^i+D_{nl0}^i$.

4.6.6. Если $j=1$, то перейти к п. 4.8.

4.7. Определение характеристик процесса ядерного взаимодействия.

4.7.1. Определить номер группы k ядерного фрагмента, образующегося при взаимодействии. Номер группы определяют из условия:

$$\sum_{j'=1}^{j'=k}P_{jj'}\leqslant\eta\cdot P_j<\sum_{j'=1}^{j'=k+1}P_{jj'}$$

4.7.2. Положить $m=m+1$ и вычислить $Q_m=P_j\cdot Q_{m-1}$.

4.7.3. Положить $P_j=P_k$, $j=k$ и определить

$$R_j=R_j(E_{m-1}).$$

4.7.4. Перейти к п. 4.5.

4.8. Определение вклада в оценку дозы от n-го испытания.

4.8.1. Положить

$$V_l^i=V_l^i+D_{nl}^i+v_l^i,$$

$$U_l^i=U_l^i+(D_{nl}^i+v_l^i)^2.$$

4.8.2. Если $n<N$, то перейти к п. 4.3.

4.9. Определить средние значения доз на глубине

$$D_l^i=V_l^i/N$$

и их средние квадратические отклонения

$$\sigma_l^i=\sqrt{\frac{1}{N}\left(\frac{U_l^i}{N}-(D_l^i)^2\right)}.$$

Если $i<6$, то перейти к п. 4.2.

4.10. Вычислить среднее значение дозы от МЗИ КЛ в точке тканеэквивалентного фантома

$$D(\vec{r_0})=\sum_{l=1}^{l=l_{max}}w^l\cdot\Delta\xi_l\cdot\sum_{i=2}^{i=6}D_l^i$$

Примечания:

1. Оценку значений доз, представленных в виде линейных функционалов от функции $F_l^i\ (\xi, E)$, проводят методом статистических испытаний.

2. Число статистических испытаний выбирают в диапазоне от 1000 до 10000 историй.

3. Считают, что зависимость функции $\Phi^i(E)$ между узлами сетки E_ν имеет степенной вид.

ПРИЛОЖЕНИЕ
Справочное

ТЕРМИНЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЯХ, И ИХ ПОЯСНЕНИЯ

Термин	Пояснение
Поглощенная доза ионизирующего излучения	По ГОСТ 15484—81
Эквивалентная доза ионизирующего излучения	То же
Космические лучи (КЛ)	По ГОСТ 25645.103—84
Энергетический спектр космических лучей	По ГОСТ 25645.104—84
Галактические космические лучи (ГКЛ)	То же
Группа ядер космических лучей	»
Представительное ядро группы ядер ГКЛ	Ядро, заряд которого наиболее близок к величине средневзвешенного по составу группы ядер ГКЛ заряда
Коэффициент качества ионизирующего излучения	По ГОСТ 15484—81
Ионизационные потери заряженных частиц	Средние потери энергии на единицу пути в среде, обусловленные взаимодействием заряженных частиц с электронными оболочками атомов тормозящей среды
Ионизационный пробег	Средний путь, проходимый заряженной частицей с данной энергией до остановки, т. е. до полной потери энергии
Средний пробег ядер до ядерного взаимодействия λ_i	Расстояние, проходимое ядрами в веществе, на котором происходит ослабление плотности потока ядер группы i за счет ядерных взаимодействий в e раз
Ядерные фрагменты	Вторичные ядра, образующиеся из налетающего ядра в ядро-ядерных взаимодействиях и имеющие скорость, близкую к скорости налетающего ядра
Параметр фрагментации P_{ij}	Среднее число фрагментов группы j, образующихся в единичном акте взаимодействия ядер группы i с ядрами атомов вещества
Нейтроны срыва	Нейтроны, образующиеся из налетающего ядра в ядро-ядерных взаимодействиях и имеющие скорость, близкую к скорости налетающего ядра

СОДЕРЖАНИЕ

1. Общие положения 1
2. Метод расчета доз в произвольной точке тканеэквивалентного фантома . 2
3. Описание входной информации 5
4. Алгоритм расчета доз в произвольной точке тканеэквивалентного фантома 5
Приложение. Справочное 9

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Безопасность радиационная экипажа космического аппарата в космическом полете. Методика расчета поглощенной и эквивалентной дозы от многозарядных ионов космических лучей

РД 50—25645.207—85

Редактор *Т. А. Киселева*
Технический редактор *М. И. Максимова*
Корректор *Л. В. Сницарчук*

Н/К

Сдано в наб 23.01.86 *Подп. в печ.* 11.03.86 Т—05461 *Формат* 60×90¹/₁₆ *Бумага книжно-журнальная* Гарнитура литературная Печать высокая 0,75 усл. п. л. 0,75 усл. кр.-отт. 0,66 уч.-изд. л. Тираж 7000 Зак. 1276 Изд. № 8928/4 Цена 5 коп.

Ордена «Знак Почета» Издательство стандартов, 123840, Москва, ГСП, Новопресненский пер., д. 3.
Вильнюсская типография Издательства стандартов, ул. Миндауго, 12/14.

gost.e-ecolog.ru